

Исследование фотопроводимости индивидуальных квантовых точек InAs/GaAs(001) методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии

Д.О. Филатов¹, И.А. Казанцева¹, Н.В. Байдусь¹, А.П. Горшков¹, В.П. Мишкин²

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603 950, Нижний Новгород, Россия

dmitry_filatov@inbox.ru

²Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 430 005, Саранск, Республика Мордовия, Россия

Исследовано распределение фототока по поверхности GaAs $p-i-n$ диода со встроенными квантовыми точками (КТ) InAs при фотовозбуждении зондом сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ). На СБОМ изображениях фототока наблюдались неоднородности, связанные с межзонным поглощением в КТ.

Investigation of photoconductivity of individual InAs/GaAs(001) quantum dots by Scanning Near-field Optical Microscopy

D.O. Filatov¹, I.A. Kazantseva¹, N.V. Baidus¹, A.P. Gorshkov¹, V.P. Mishkin²

¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 60 3950, Nizhni Novgorod, Russia

²Ogarev Mordovia State University, 430 005, Saransk, Mordovia Republic, Russia

The photocurrent distribution in GaAs $p-i-n$ diode with embedded InAs quantum dots (QDs) was studied with the photoexcitation through a Scanning Near-field Probe Microscope (SNOM) probe. The inhomogeneities related to the interband absorption in the QDs were observed in the photocurrent SNOM images.

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) — метод, предназначенный для измерения пространственного распределения различных оптических параметров поверхности в нанометровом масштабе [1]. Среди этих параметров, сравнительно мало исследовалась фотопроводимость (ФП) при фотовозбуждении СБОМ зондом [2]. В [3] методом ФП-СБОМ исследованы Si p^+-n фотодиоды со встроенными самоформирующимися наноструктурами GeSi. На СБОМ изображениях фототока наблюдались неоднородности, связанные с межзонным оптическим поглощением в наноструктурах GeSi. Таким образом, была продемонстрирована возможность визуализации методом ФП-СБОМ индивидуальных наноструктур GeSi с пространственным разрешением ~ 100 нм.

В настоящей работе методом ФП-СБОМ исследованы GaAs $p-i-n$ фотодиоды со встроенными квантовыми точками (КТ) InAs. Диодные структуры были выращены на подложках n^+ -GaAs(001) методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на установке AIX 200RF. На поверхности слоя i -GaAs методом самоформирования по механизму Странски-Крастанова при температуре роста 490°C формировался массив КТ InAs, который зарастивался покровным слоем p^+ -GaAs толщиной ≈ 30 нм. Морфология КТ исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в атмосферных условиях при помощи АСМ NT-MDT Solver Pro на образцах-спутниках с поверхностными КТ, выращенными в тех же условиях. Кроме когерентных КТ InAs высотой 5-7 нм и латеральными размерами 14-18 нм (Рис. 1а), на поверхности наблюдались релаксированные кластеры InGaAs с латеральными размерами 100-300 нм и высотой 30-50 нм, возникающие в результате коалесценции КТ [4]. Заметим, что латеральные размеры КТ на Рисунке 1а увеличены до 40-50 нм вследствие эффекта конволюции [5].

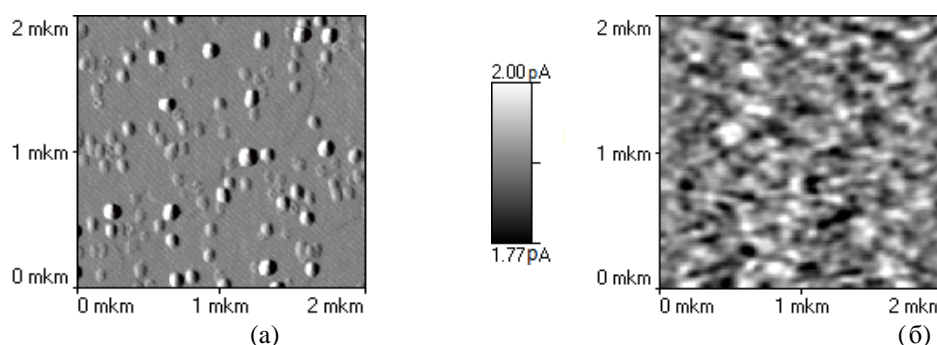


Рисунок 1. СБОМ изображение фототока на поверхности GaAs $p-i-n$ диода с КТ InAs (а); АСМ изображение образца-спутника с поверхностными КТ InAs/GaAs(001) (б).

На базе $p-i-n$ структур были сформированы меза-фотодиоды с окном в верхнем контакте диаметром ≈ 200 мкм. Исследования ФП-СБОМ проводились на NT-MDT Solver SNOM при 300 К с модулированным фотовозбуждением. В качестве источника фотовозбуждения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 1310 нм, соответствующей энергии межзонных оптических переходов между основными размерно-квантованными состояниями электронов и дырок в КТ. Регистрация фототока проводилась при помощи синхронного детектора Stanford Research SR-530.

На ФП-СБОМ изображениях (Рис. 1б) наблюдались особенности, связанные с межзонным оптическим возбуждением электронов из состояний валентной зоны в КТ и релаксированных кластерах InGaAs в состояния зоны проводимости с последующей эмиссией электронов и дырок из КТ (кластеров). Минимальный размер особенностей на Рис. 1б составляет ~ 100 нм, что соответствует паспортному значению диаметра апертуры используемых СБОМ зондов, которое и определяет пространственное разрешение метода. Заметим, что в ФП-СБОМ изображениях проявляются лишь те КТ, в которых энергии каких-либо разрешённых межзонных переходов между размерно-квантованными состояниями совпадают с энергией кванта возбуждающего излучения. Поскольку КТ имеют естественный разброс по размерам (и, соответственно, по энергиям межзонных переходов), лишь малая часть КТ проявляется на ФП-СБОМ изображениях. Как следствие, поверхностная плотность особенностей на ФП-СБОМ изображении (Рис. 1а) размерами ~ 100 нм существенно меньше плотности КТ на АСМ изображении (Рис. 1б). Остальные КТ проявляются на СБОМ изображении как тёмные пятна на фоне постоянного фона (связанного с примесной фоточувствительностью GaAs) вследствие рассеяния излучения, выходящего из апертуры СБОМ зонда на индивидуальных КТ [6]. В релаксированных кластерах InGaAs эффект размерного квантования практически отсутствует ввиду их больших размеров, поэтому они проявляются на ФП-СБОМ изображениях в виде светлых пятен, плотность и размеры которых согласуются с плотностью и размерами кластеров на АСМ изображениях (Рис. 1).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (16-02-00450).

1. M.A. Paesler, P.J. Moyer, *Near-Field Optics: Theory, Instrumentation, and Applications* (Wiley Interscience), 7 (1996).
2. Cricenti, R. Generosi, C. Barchesi, M. Luce, M. Rinaldi, *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 3240 (1998).
3. Д.О. Филатов, И.А. Казанцева, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, А.П. Горшков, В.П. Мишкин, *ФТП* **51**, 563 (2017).
4. I.A. Karpovich, B.N. Zvonkov, N.V. Baidus', S.V. Tikhov, D.O. Filatov, *Trends in Nanotechnology Research* (Nova Science), 173 (2004).
5. А.А. Бухараев, Н.В. Бердунов, Д.В. Овчинников, К.М. Салихов, *Микроэлектроника* **26**, 163 (1997).
6. И.А. Карпович, Д.О. Филатов, С.В. Морозов, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, Ю.Ю. Гущина, *Известия РАН: Серия физическая* **63**, 313 (2000).